

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540302

研究課題名(和文)原子核乾板における低エネルギー電子飛跡の高速自動同定

研究課題名(英文)Automatic identification for low energy electrons by nuclear emulsion

研究代表者

佐藤 修 (Sato, Osamu)

名古屋大学・エコトピア科学研究所・助教

研究者番号：20377964

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：原子核乾板の自動飛跡装置の高速化により大規模実験が可能になる一方で全自動飛跡読み取り装置では本物飛跡のみならずノイズ飛跡が大量に認識される。ノイズ飛跡の主成分にコンプトン電子飛跡がある。本研究課題ではコンプトン電子の認識及び削減を行った。まず原子核乾板の断層映像の層数を16層から32層にしてノイズ飛跡を従来比の10分の1にした。またアルファ線の自動認識にも取り組み20ミクロン以上の飛程を持つ線を90%の検出効率で捉える事に成功した。ノイズ飛跡と宇宙線飛跡の分別を多変数BDT解析で行い、ノイズ飛跡が多くフィルム間のアライメントに失敗していたデータに適応しアライメントをとることに成功した。

研究成果の概要(英文)：Increase of automatic scanning power and its track recognition make large scale experiments for elementary particle physics possible. While automatic scanning system produces huge amount of tracks not only real tracks but mainly "noise" tracks. The track of Compton electrons are the main part of the noise tracks. This study is aimed to recognize low energy electron track as it is and separate from minimum ionizing particle's tracks (signals for standard analysis). As the first step, number of image frames is increased from 16 to 32 layers and resulting a reduction of noise tracks as 1/10. By tuning the algorithm to alpha ray tracks (>20um), we got more than 90% efficiency for alpha tracks. The noise track reduction study was continued with plate to plate alignment failed data sets. The failures are caused due to huge contamination of noise tracks in cosmic ray track data. The alignment of about 100 data sets were recovered after the study of multi variable BDT analysis.

研究分野：素粒子物理学

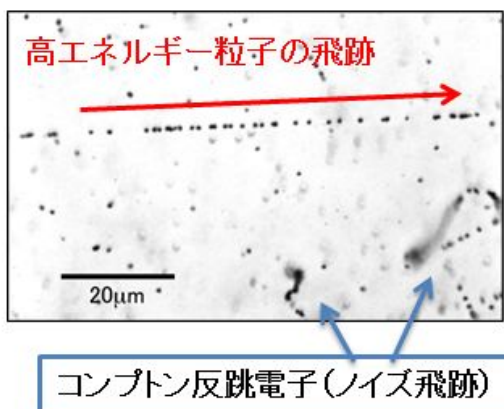
キーワード：ニュートリノ 低エネルギー電子 飛跡分別 シグナル/ノイズ

### 1. 研究開始当初の背景

サブミクロンの位置分解能を持ち、素粒子・原子核物理学の発展に重要な発見をもたらした原子核乾板はその初期において観測者が顕微鏡により飛跡を観察・計測していた。そのため飛跡検出器の中で最良の位置分解を持つものでありながら大規模実験では用いられてこなかった。そこで 1970 年台に原子核乾板からの飛跡読み取りの自動化が丹羽公雄（現名古屋大名誉教授）らにより進められ 1994 年からのニュートリノ振動実験 CHIRUS 実験以降、中野敏行（名古屋大、連携研究者）により全自動スキャンが実現した。その後、更なる全自動飛跡読み取り装置の高速化がはかられ 2008 年実験開始の OPERA 実験では 100 倍速の全自動飛跡認識装置（SUTS）がフル稼働し  $\mu$ ニュートリノからニュートリノへのニュートリノ振動現象を 4 事象のニュートリノ反応のアピランス検出で観測に成功している。現在は次世代の読み取り装置（HTS）が OPERA 時の 100 倍速で稼働し始めている。

全自動読み取り装置での飛跡の読み取りは検出効率を担保するために飛跡認識の閾値を低くして稼働する。そのために大量の偽の飛跡（以後ノイズ飛跡）が出力される。ノイズ飛跡はその原子核乾板フィルムに蓄積された環境線、線によるコンプトン電子による飛跡で原子核乾板乳剤中で散乱するものが主成分である（図参照）。その他に原子核乾板フィルムに不純物として混入しているトリウムなどからの線の一部が飛跡として認識されることがある。コンプトン電子や線の直線部分が飛跡認識アルゴリズムにより飛跡として認識されることになるが必ずしも認識された角度は実在のコンプトン電子や線のものを正しく反映しなくなっている。通常はこれらのノイズ飛跡は高エネルギー素粒子実験の解析の邪魔になるために削減すべき対象となっていた。

### 光学顕微鏡画像



### 2. 研究の目的

前述のように全自動飛跡認識装置の高速化により原子核乾板を用いた大規模実験が可能になってきた。このような状況のもと、原子核乾板の持つ性能を最大限に使い切るには人間が顕微鏡で確認できるレベルの飛跡の分類、最小電離粒子の飛跡とノイズ飛跡の分類を自動スキャンで実現する必要がある。

原子核乾板乳剤中での多重電磁散乱により直線状ではない低エネルギー電子の飛跡は飛跡を構成する現像銀の並びに多重散乱としての規則性があるために低エネルギー電子として認識ができるはずである。そこで本研究課題ではまず最小電離粒子の飛跡とノイズ飛跡の分別を高効率に行う手法を開発する。そして従来はノイズ飛跡として解析の邪魔であった低エネルギー電子の飛跡を低エネルギー電子そのものとして認識する事を目指す基礎研究をする。低エネルギーの認識が高効率で行えるアプリケーションとして原子核乾板を用いたダブル崩壊の探索実験等が考えられる。

### 3. 研究の方法

実際に OPERA 実験の解析で使われている原子核乾板（OPERA film）を顕微鏡スキャンして各種パラメータを調整することで最小電離粒子の飛跡とノイズ飛跡の分離の最適化を行った。

OPERA film は 200 ミクロンの透明なプラスチックベースの両面に 45 ミクロンの原子核乾板乳剤厚を塗布して作られている。この 45 ミクロンの乳剤に荷電粒子の飛跡が記録される。通常は顕微鏡の焦点深度約 3 ミクロンを考慮してこの 45 ミクロンを厚さ方向に 16 分割して断層映像を取り込む。全自動飛跡読み取り装置はこの 16 層にサンプリングされた画像情報から深さ方向に直線状の飛跡を機械的に再構成して出力する。人間の目による目視観察に比べて欠落している情報としては主として 2 点ある。断層映像のサンプリング数の少なさ。周辺情報を活用していない。では人間が顕微鏡観察する場合は厚さ方向に事実上断層画像数は無限サンプリングに対応した z 方向に連続的な観察するため飛跡を構成する現像銀粒子の観察の漏らしが無い。に関しては全自動飛跡認識装置の場合はコンプトン電子のように飛跡が曲線になっていたりすると検出効率落ちる。また他の飛跡が重なっている場合は誤認をおこしやすい。

そこでまず人間の飛跡認識に迫るため、原子核乾板の断層映像数を 16 層から 32 層に増やす試みを行った。また人間のような各種情報を取り入れ総合判断する事を疑似的に機械学習で行わせることで飛跡の分別の改善を試みた。

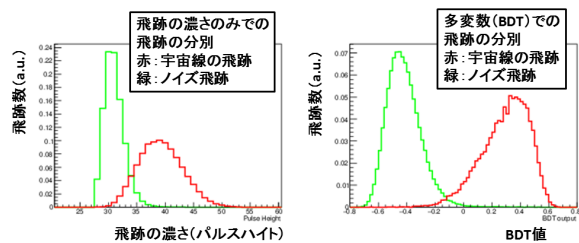
#### 4. 研究成果

まず断層映像を 16 層から 32 層に増やし飛跡を構成する銀粒子の認識の 2 値化の閾値の調整を行った。また同時に読み出し画像のピクセル分解能を 1 ピクセルあたり 0.3 ミクロンから 0.1 ミクロンへと高精細化した読み出しを行った。この結果最小電離粒子の飛跡検出効率を従来と同程度に保ったままノイズ飛跡の量を約 1/10 に減らすことができた。

次に低エネルギー電子以外のノイズ飛跡の線を捉える試みを行った。線は電離損失が極端に大きく原子核乾板では現像銀粒子がびっしりと詰まった非常に濃い飛跡として蓄積される。そのために自動飛跡認識のアルゴリズムでは実在の粒子の一部を捉えたのみでも飛跡認識の閾値を超えてノイズ飛跡として出力される。しかも一部の現像銀が引かただけでも閾値を超えるので自動認識された角度や飛跡の濃さ情報は正しくなく最小電離粒子のものと区別がつかないことがある。そこで積極的に線を線として認識する事でノイズとして落とす。人間が顕微鏡下で検出しておいた飛程 20 ミクロン以上の線をサンプルにして画像解析を行い約 90%の効率で線の検出に成功した。

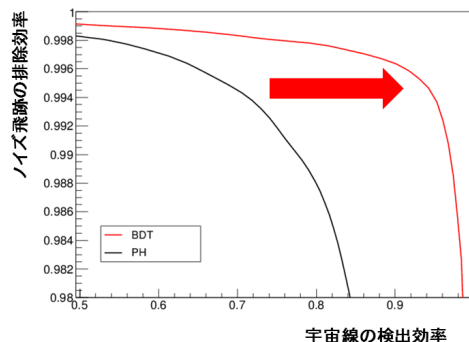
最小電離粒子として宇宙線を用い宇宙線の飛跡とコンプトン電子の飛跡の分別を人間の総合判断に近い形として多変数解析手法の適用を試みた。多変数解析として用いる情報は全自動飛跡読み取り装置から出力される飛跡情報である。1 枚の OPERA filmからはベースの両面の原子核乾板乳剤層のそれぞれから飛跡の角度 (ax, ay) ベース面での場所 (x, y) 飛跡の濃さ (PH) 情報が得られる。ベースは個体 (プラスチック) であるため現像処理後でも歪みが少なくベースの両面の飛跡位置を結んだ仮想直線は貫通した粒子の角度、場所情報を正確に記録している。このためこの仮想直線をベーストラックと呼び角度の精度の良い“飛跡”として利用している。一方で原子核乾板乳剤層はゼラチンからなり現像の過程で伸縮するために歪みが生じ角度精度が悪くなる。ベーストラックと原子核乾板で認識された飛跡の角度差 ( $dax, day$ ) は最小電離粒子の場合は  $\approx 20\text{mrad}$  程度の広がりを持つ分布になる。一方で乳剤層 2 面のノイズ飛跡のチャンスインシデンスでベーストラックが構成されている場合の角度差分布は角度差許容値までの一様分布になる。また飛跡の濃さ情報はノイズ飛跡の場合はコンプトン電子飛跡の直線部の一部しか捉えていないので宇宙線の場合に比べ低くなる。宇宙線飛跡の場合、ベーストラックとの角度差と飛跡の濃さには弱い相関関係があり、飛跡の濃さがうすいものは角度差が大きくなる。このような相関がある場合はカイ 2 乗やライクリーフッド関数での 1 次元的な閾値による飛跡の分別では十分に取扱いえない。そこで BDT の手法を適用し、これらの変数を用いて宇宙線飛跡と

ノイズ飛跡の分別を試みた。



宇宙線の飛跡とノイズ飛跡の分別、機械学習サンプルの分布。  
左: 飛跡の濃さの情報のみでの分別、  
右: ベーストラックとの角度差及び飛跡の濃さを BDT での分別。

実際のサンプルは OPERA でのニュートリノの反応解析の宇宙線を用いたフィルム間のアライメントに失敗していたものを用いた。フィルム間のアライメントではフィルム 1 とフィルム 2 でそれぞれ独立に再構成されたベーストラック集団の総当たりで角度、相対位置関係が合うものを探しフィルム間の正しい位置関係を得る。ここで母集団のベーストラック集団にノイズ飛跡が多すぎるとアライメント位置を出すことができなくなる。宇宙線飛跡のみによる機械学習、ノイズ飛跡のみによる機械学習によりパラメータ調整をおこなって宇宙線とノイズ飛跡の分別の BDT 閾値を決定した。アライメントに失敗していた約 100 例に足してこの BDT 閾値を適用する事でアライメントに成功した。



#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 6 件)

J. Yoshida, O. Sato, T. Nakano, K. Morishima et.al, Development and utilization of 'Plate Changer' system for neutrino interactions in OPERA emulsion target. JINST 8 2013 P02009

以下の OPERA Collaboration の論文全てで、佐藤修、中野敏行、森島邦博は共著者である。

OPERA Collaboration  
Search for  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  oscillations with the OPERA experiment in the CNGS beam. JHEP 7 2013 004

OPERA Collaboration,  
New results on  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$  appearance  
with the OPERA experiment in the CNGS beam.  
JHEP 11 2013 36

OPERA Collaboration,  
Evidence for  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$  appearance in  
the CNGS neutrino beam with the OPERA  
experiment.  
Phys.Rev.D 89 2014 51102

OPERA Collaboration  
Observation of tau neutrino appearance in  
the CNGS beam with the OPERA experiment.  
PTEP 10 2014 101C01

OPERA Collaboration  
Procedure for short-lived particle  
detection in the OPERA experiment and its  
application to charm decays.  
Eur.Phys.J C74 2014 2986

〔学会発表〕(計 9件)

佐藤修、  
ニュートリノ振動実験 OPERA の解析状況、  
日本物理学会、2012年9月13日、京都産業  
大

佐藤修、  
ニュートリノ振動実験 OPERA の最新結果、  
日本物理学会、2013年3月27日、広島大学

O.Sato, OPERA Results  
The 12<sup>th</sup> International Workshop on tau  
lepton physics、2012年9月19日、名古屋  
大学

佐藤修  
ニュートリノ振動実験 OPERA の最新結果、  
日本物理学会、2013年9月23日、高知大学

O.Sato  
Present and Future Emulsion detector,  
International Symposium on EcoTopia  
Science 2013  
2013年12月14日、名古屋大学

O.Sato  
Evidence for  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$  oscillation by  
appearance mode from OPERA experiment.  
KMI International Symposium 2013  
2013年12月12日、名古屋大学

佐藤修  
ニュートリノ振動実験 OPERA の最新結果、  
日本物理学会、2014年3月30日、東海大学

白石卓也、佐藤修、他  
OPERA 検出器による宇宙線事象解析  
日本物理学会、2014年9月19日、佐賀大学

早川友博、佐藤修、他  
OPERA 実験における BDT を用いたフィルム間  
アライメントの改善、  
日本物理学会、2015年3月22日、早稲田大  
学

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等  
名古屋大学理学研究科・素粒子宇宙物理系 F  
研 基本粒子研究室  
<http://flab.phys.nagoya-u.ac.jp/2011/>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者  
佐藤 修 ( )  
名古屋大学・エコトピア科学研究所・助教  
研究者番号：20377964

(2) 研究分担者  
( )

研究者番号：

(3) 連携研究者  
中野 敏行 ( )  
名古屋大学・理学研究科・講師  
研究者番号：50345849

森島 邦博 ( )  
名古屋大学・高等研究院・特任助教  
研究者番号：30377915